

**Белорусский государственный университет**

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по учебной работе

А.Д. Толстик

Регистрационный № УД- *1362* /баз.

## **НЕРАВНОВЕСНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ**

**Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности:**

**1-31 04 01 Физика (по направлениям)**

**Направление:**

**1-31 04 01-02 Физика (производственная деятельность)**

Минск 2014

**СОСТАВИТЕЛЬ:**

**Н.А.Дроздов** — доцент кафедры энергофизики Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент.

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

**Г.П.Яблонский** — заведующий лабораторией физики и техники полупроводников Института физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук, профессор;

**Н.А.Поклонский** — профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники, доктор физико-математических наук, профессор.

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой энергофизики физического факультета Белорусского государственного университета

(протокол № 11 от 13 мая 2014 г.);

Советом физического факультета Белорусского государственного университета

(протокол № 10 от 29 мая 2014 г.);

Научно-методическим советом Белорусского государственного университета

(протокол № 6 от 20 июня 2014 г.)

Ответственный за редакцию: Н.А.Дроздов

Ответственный за выпуск: Н.А.Дроздов

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа «Неравновесные электронные и оптические процессы» разработана для специальности 1-31 04 01 Физика (по направлениям) для направления 1 -31 04 01-02 производственная деятельность.

Данный курс является составной частью материаловедческого цикла курсов студентов-энергофизиков. Он продолжает курс «Основы материаловедения», читаемый на 3 курсе. В свою очередь именно на этот курс опирается последующая спецдисциплина материаловедческого цикла «Твердотельная электроника».

Цель спецкурса – дать основные представления о физике протекания неравновесных процессов с участием носителей заряда в конденсированных средах, включая и оптические процессы.

Построение спецкурса достаточно традиционное. Вначале рассмотрены процессы поглощения света в конденсированных средах и генерации неравновесных носителей заряда. Далее излагаются вопросы рекомбинации, диффузии и дрейфа неравновесных носителей.

Особое внимание уделено аспектам практического использования получаемых теоретических знаний. Например, достаточно подробно рассмотрены вопросы определения времени жизни носителей заряда из анализа кинетики спада фотопроводимости, люминесцентного качественного и количественного анализа содержания примесей в полупроводниковых кристаллах, вопросы возникновения фотоэдс, являющиеся основой для функционирования солнечного элемента и некоторые другие.

Материал курса основан на базовых знаниях и представлениях, заложенных в общих курсах оптики, атомной физики, квантовой механики и др.

В результате изучения дисциплины студент должен:

**знать:**

- основные понятия и определения физики неравновесных процессов в конденсированных средах;
- сущность процессов генерации, рекомбинации, диффузии и дрейфа неравновесных носителей заряда;

**уметь:**

- пользоваться кинетическими понятиями физики неравновесных процессов: скорость генерации и рекомбинации, время жизни носителей заряда и время прохождения определенного процесса, например захвата на центр, нахождения на центре и др.;

**владеть:**

- методами расчета концентраций неравновесных носителей заряда из уравнений неразрывности с разными начальными и граничными условиями.

Программа курса составлена в соответствии с требованиями образовательного стандарта. Общее количество часов – 87, аудиторное количество часов – 40, из них: лекции – 32, контролируемая самостоятельная работа студентов – 8. Форма отчётности — экзамен.

## ПРИМЕРНЫЙ ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН ДИСЦИПЛИНЫ

№ п/п	Название темы	Лекции	Практич. занятия	Семинары	Лаборат. занятия	Контролируемая самостоятельная работа	Всего
	Введение в дисциплину	2					2
1.	Взаимодействие оптического излучения с конденсированными средами	8					8
2.	Генерационно- рекомбинационные процессы в конденсированных средах	12				4	16
3.	Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда	10				4	14
	<b>Итого</b>	<b>32</b>				<b>8</b>	<b>40</b>

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

### Введение в дисциплину

Уравнение Шредингера для кристалла и методы его решения.

Зоны Брюллюэна и обратная решетка. Разрешенные и запрещенные энергетические зоны. Эффективная масса электрона.

Зонная структура реальных кристаллов. Прямозонные и непрямозонные кристаллы.

Примеси и дефекты в кристаллической решетке. “Водородоподобная” примесь.

Квазичастицы – кванты коллективных движений частиц в твердых телах. Экситоны в кристаллах.

### 1. Взаимодействие оптического излучения с конденсированными средами

Взаимодействие электромагнитной волны с твердым телом. Коэффициенты взаимодействия света с веществом. Закон Бугера-Ламберта. Классическая теория оптических свойств металлов Друде-Лоренца. Плазменные колебания.

Законы сохранения энергии и импульса в процессах поглощения света.

Квантовомеханический расчет поглощения света свободными носителями заряда.

Процессы с участием третьих частиц. Роль примесей и фононов в процессах поглощения света свободными носителями заряда.

Фундаментальное поглощение света. Разрешенные и запрещенные переходы. Зависимость коэффициента поглощения от энергии квантов для разрешенных переходов.

Фундаментальное поглощение в непрямозонных полупроводниках и диэлектриках.

Роль фононов в процессах фундаментального поглощения. Вероятность

двухчастичного и трехчастичного взаимодействия. Зависимость коэффициента поглощения для непрямых оптических переходов. Экситонное поглощение. Двухфотонное поглощение. Примесное поглощение. Переходы “примесь-зона” и между основным и возбужденным состояниями примеси. Фононное поглощение света.

## **2. Генерационно-рекомбинационные процессы в конденсированных средах**

Равновесные и неравновесные носители заряда (ННЗ). Генерация и рекомбинация носителей заряда. Генерация ННЗ при оптическом поглощении. Другие типы генерации ННЗ.

Неравновесная проводимость, фотопроводимость. Высокий и низкий уровень возбуждения. Квазиуровни Ферми. Время жизни носителей заряда.

Релаксация неравновесной фотопроводимости. Линейная и квадратичная рекомбинация. Метод измерения времени жизни носителей заряда из анализа кинетики спада фотопроводимости.

Межзонная излучательная рекомбинация. Постановка задачи ван Русбрека-Шокли и вычисление скорости межзонной излучательной рекомбинации. Статистика межзонной излучательной рекомбинации. Экситонная излучательная рекомбинация. Излучательная рекомбинация и люминесценция. Другие каналы люминесценции. Люминесцентный анализ кристаллов.

Ударная (Оже) рекомбинация. Законы сохранения при Оже-рекомбинации. Статистика процессов ударной рекомбинации.

Рекомбинация через локальные центры. Модель Лэкса. Статистика рекомбинации через локальные центры (модель Шокли-Рида-Холла). Уровни рекомбинации и уровни прилипания. Релаксация неравновесной проводимости при рекомбинации через локальные центры.

## **3. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда**

Электронные процессы в кристаллах при наличии градиента концентрации носителей заряда. Монополярная диффузия. Диффузионная длина и ее связь с временем жизни ННЗ.

Биполярная диффузия и дрейф. Длина амбиполярной диффузии. Диффузионная и дрейфовая подвижность. ЭДС Дембера. Фотоэлектромагнитный эффект Кикоина-Носкова. Вентильная фото-эдс. Солнечный элемент.

Поверхностные состояния в кристаллах и их природа. Понятие поверхностной рекомбинации. Скорость поверхностной рекомбинации. Стационарное распределение ННЗ в кристалле при наличии поверхностной рекомбинации при равномерном возбуждении объема кристалла и при оптическом (приповерхностном) возбуждении.

# **ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

## *Формы контроля знаний*

### ***Рекомендуемые расчетные задачи для самостоятельного решения***

Расчет температурной зависимости концентрации носителей заряда в разрешенных зонах германия и кремния, легированных однозарядной примесью.

Расчет профиля функции генерации ННЗ в кремнии при освещении его солнечным светом.

Расчет спектрального контура линии излучения «зона-зона» и экситонного излучения кремния при разных температурах.

Расчет профиля распределения ННЗ в кремнии при оптическом возбуждении монохроматическим и немонахроматическим (солнечным) спектром с учетом поверхностной рекомбинации.

Расчет спектральной зависимости сигнала собственной фотопроводимости образца кремния при разных значениях скорости поверхностной рекомбинации.

### **III. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

#### ***а) Основная***

1. Шалимова К.В. Физика полупроводников. М.: Энергия, 1985 год.
2. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978 год.
3. Блекмор Дж. Физика твердого тела. М.: Мир, 1988 год.
4. Горбачев В.В., Спицина Л.Г. Физика полупроводников и металлов. М.: Металлургия, 1976 год.
5. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников. М.: Высшая школа, 1984 год.
6. Аут И., Генцов Д., Герман К. Фотоэлектрические явления. М.: Мир, 1980 год
5. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. М.: Мир, 2001.

#### ***б) Дополнительная***

1. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1977 год.
2. Зеегер К. Физика полупроводников. М.: Мир. 1977 год.
3. Смит Р. Полупроводники. М.: Мир. 1982 год.
4. Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М.: Физматгиз, 1963 год.
5. Сердюк В.В., Чемересюк Г.Г., Терек М. Фотоэлектрические процессы в полупроводниках. Киев – Одесса: Вища школа, 1982 год.
6. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела. М.: Мир, 1969 год.